

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСЕДАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СОВМЕСТНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ СО СПУТНИКОВ SENTINEL-1A И SENTINEL-1B

В.А. Тютюкова, Пермский Национальный Исследовательский Политехнический Университет, Пермь, Россия
Д.В. Голубничий, Д.Х. Гилязов, ООО «Яковлевский ГОК», Яковлево, Россия

Аннотация: В статье приведены результаты исследований оседаний земной поверхности на территории Яковлевского ГОКа за период с 2019 по 2021 гг. Выполнена совместная интерферометрическая обработка данных космического радиолокационного зондирования Земли со спутников Sentinel-1a и Sentinel-1b. Проведено сопоставление результатов определения оседаний методом нивелирования и методом радарной интерферометрии по профильным линиям. Определено, что положение мульды оседаний для спутников Sentinel-1a и Sentinel-1b имеет различные значения. Установлено, что совместная интерферометрическая обработка данных со спутников Sentinel-1a и Sentinel-1b является наиболее эффективным методом определения истинных значений оседаний земной поверхности. Результаты исследований могут быть полезными при выборе метода мониторинга оседаний земной поверхности.

Ключевые слова: земная поверхность, определение оседаний, мульда оседаний, радарная интерферометрия, радиолокационная съемка, мониторинг деформационных процессов, дистанционное зондирование, спутник Sentinel-1.

DETERMINATION OF LAND SURFACE SUBSIDENCE FROM THE JOINT INTERFEROMETRIC PROCESSING OF SENTINEL-1A AND SENTINEL-1B SPACEBORNE RADAR DATA

V.A. Tiutiukova, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia
D.V. Golubnichy, D.H. Gilyazev, Yakovlevskiy GOK, Yakovlevo, Russia

Abstract: The article presents the results of studies of land surface subsidence on the territory of the Yakovlevsky GOK for the period from 2019 to 2021. Joint interferometric processing of satellite radar data from satellites Sentinel-1a and Sentinel-1b. The results of subsidence determination by leveling and radar interferometry along the profile lines were compared. The position of the subsidence trough for Sentinel-1a and Sentinel-1b satellites was determined to be different. It was found that the joint interferometric processing of data from Sentinel-1a and Sentinel-1b satellites is the most effective method of determining the true values of subsidence of the Earth's surface. The results of the research may be useful in selecting a method for monitoring subsidence of the Earth's surface.

Keywords: land surface, subsidence detection, subsidence trough, radar interferometry, radar imaging, deformation monitoring, remote sensing, Sentinel-1.

Известно, что интенсивная добыча полезных ископаемых приводит к увеличению нагрузки на недра и возникновению напряженно деформированного состояния больших объемов горной массы. В процесс деформаций вовлекаются значительные территории, которые нуждаются в мониторинге. Анализ и мониторинг оседаний земной поверхности в местах, находящихся в зоне влияния горных работ, позволяет сделать значимые выводы для исключения возникновения опасных техногенных ситуаций. [1-3].

Яковлевское месторождение богатых железных руд расположено в Белгородской области на территории Яковлевского района в 30 км к северу от г. Белгород и является одним

из крупнейших в России и в мире. По запасам руд и их качеству данное месторождение является уникальным среди открытых и эксплуатируемых на данный момент месторождений. Гидрогеологические и горнотехнические условия делают разработку месторождения наиболее сложной, в связи с чем мониторинг развивающихся деформаций земной поверхности является обязательным условием обеспечения безопасной разработки данного месторождения.

Одним из наиболее удобных вариантов мониторинга территории месторождений, наряду с традиционными маркшейдерско-геодезическими методами является метод радарной интерферометрии [4-7]. Он позволяет получить информацию, связанную с деформациями, вызванными горными

работами. В настоящее время технология определения оседаний земной поверхности при помощи радарной космической интерферометрии применяется во всем мире, как при разработке месторождений полезных ископаемых, так и с целью мониторинга природных явлений (оползни, вулканы, землетрясения и др.) [8].

Цель исследования: определение оседаний земной поверхности по результатам совместной интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования Земли со спутников Sentinel-1a и Sentinel-1b и сопоставление полученных результатов с данными нивелирования.

Методика исследований

Данные радиолокационной интерферометрии с одного космического аппарата не позволяют произвести трехмерные измерения сдвижений точек земной поверхности. Зондирование производится в наклонном направлении и выявленные оседания или поднятия интерпретируются как укорочение или удлинение вектора зондирования на величину смещения фазы. Классически, изменение длины вектора интерпретируется как оседания, так как это физическое явление более распространено. Однако изменения длины вектора зондирования могут быть следствием горизонтальных сдвижений.

В данной работе космический радарный мониторинг осуществлялся с двух орбитальных положений, поэтому возникла возможность оценить оседания земной поверхности, а также отделить от них горизонтальные сдвижения.

Учитывая, что в большинстве зон сдвижений происходят одновременно оседания и горизонтальные сдвижения, трехмерная интерпретация векторов сдвижений с разнонаправленных орбитальных положений не может быть выполнена однозначно без введения дополнительных условий.

Для решения задачи выявления оседаний требуется определить координаты точки в пространстве относительно начала отчета. Данные радарной интерферометрии предоставляют сведения об изменении длины вектора в пространстве. Данное изменение вектора в пространстве образует нормальную плоскость смещений, на которой может быть представлено множество вероятных положений точки. Известно, что точка в пространстве может быть найдена с помощью пересечения плоскости с прямой, или с помощью пересечения трех плоскостей. Традиционно, радарная интерферометрия определяет положение точки как пересечение отвесной прямой с нормальной плоскостью вектора сдвижения.

В данной работе, для обработки данных дистанционного зондирования (ДДЗ) — сцен со спутника Sentinel-1a и Sentinel-1b использовалось программное средство GAMMA (GAMMA Remote Sensing, Швейцария) [9]. Использовались данные за период с 2019 по 2021 гг. Количество использованных сцен с космического аппарата (КА) Sentinel-1a составило 56 шт., для Sentinel-1b 55 шт. Данные за 2022г. не использовались по причине выхода из строя одного из спутников — Sentinel-1b в декабре 2021 года.

Известно, что дифференциальная интерферограмма отображает смещение фаз принятого сигнала обусловленного, как сдвигами земной поверхности, так и случайными ошибками задержки фаз в атмосфере [10-12]. В рамках работы в программе GAMMA выполнялось площадное развертывание фазы [11]. Для каждой интерферограммы была получена карта оседаний земной поверхности без корреляционной пороговой маски, то есть осуществлялось развертывание по всей площа-

ди в пределах квадрата 500*500 пикселей. Установлено, что каждая интерферограмма может содержать в себе случайные и грубые ошибки, которые могут возникать из-за погодных условий и степени изменённости поверхности [13-15].

Архив данных содержит сцены с интервалом 12 дней в количествах от 7 до 19 шт. за бесснежный сезон каждого наблюдаемого года. Обработка ДДЗ Sentinel-1a предполагала внутрисезонное построение интерферограмм с интервалом не более 24 дней и определение среднегодовых скоростей с наивысшей точностью, используя многократное определение оседаний на основе множества сформированных интерферограмм. Так были получены карты оседаний на сезоны 2019-2021 гг.

Карты оседаний имеют относительные величины смещений, то есть, не имеют абсолютных величин относительно какой-то опоры [16]. Для определения абсолютных значений оседаний производилось вписывание средней плоскости по методу наименьших квадратов в поверхность карт оседаний. Дополнительно, для более точной ориентации карт оседаний по высоте, могут использоваться сведения о стабильных областях, например, в областях опорных реперов. Так же в пространственное положение точек была введена поправка за ортотрансформирование [17].

Результаты исследований и их обсуждение

При обработке данных для рассматриваемого месторождения за период с 2019 по 2021 гг. были использованы данные с двух КА Sentinel-1a и Sentinel-1b. Орбиты у этих КА разнонаправленные: Sentinel-1a производит съемку в восточном наклонном направлении, двигаясь на север, Sentinel-1b — в западном, двигаясь на юг (если не считать угол склонения орбиты). При раздельной обработке данных двух КА Sentinel-1a и Sentinel-1b было установлено, что мульда оседаний на месторождении имеет различное положение (рис. 1). Мульда оседаний для КА Sentinel-1a смещена на северо-запад, для КА Sentinel-1b на юго-восток. Разница между центрами мульды сдвижений составляет 288 м.

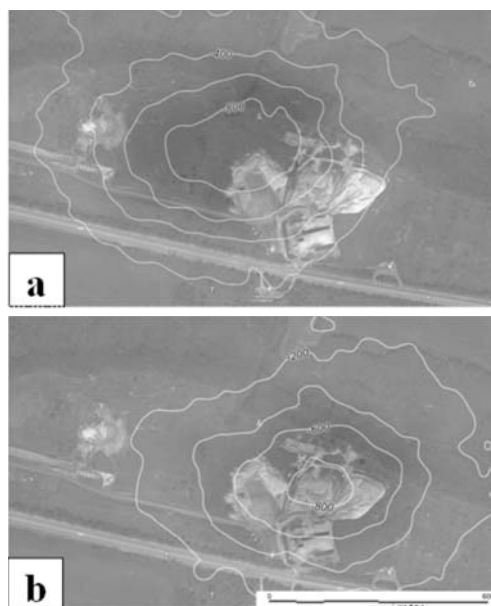


Рис. 1. Сравнение положения мульды оседаний для КА Sentinel-1a (a) и Sentinel-1b (b) по результатам интерферометрической обработки данных /
Fig. 1. Comparison of subsidence trough positions for Sentinel-1a (a) and Sentinel-1b (b) from interferometric data processing

При сравнении полученных значений вертикальных смещений (рис. 2) можно сделать вывод, что полученные значения мутьды оседаний для спутников Sentinel-1a и Sentinel-1b имеет различные значения. При сопоставлении профилей оседаний для реперов наблюдательной станции так же наблюдается смещение мутьды оседаний от данных, полученных по результатам нивелирования, на величину 200 м (рис. 2).

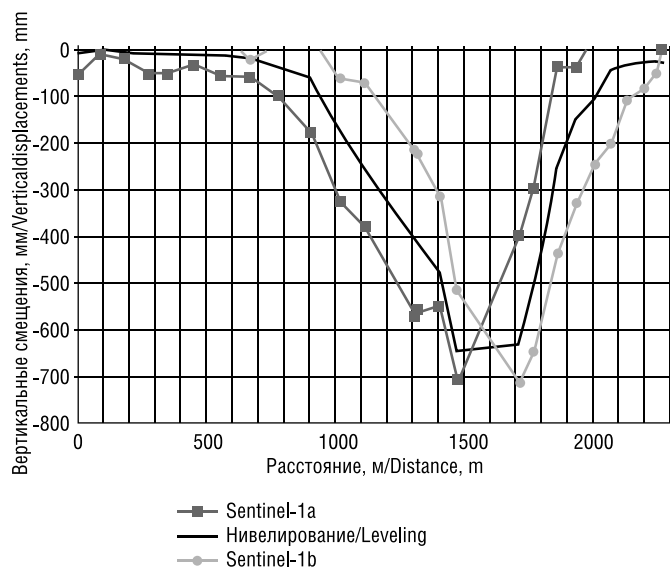


Рис. 2. График сопоставления определения оседаний методом нивелирования и методом радарной интерферометрии при раздельной обработке данных КА Sentinel-1a и Sentinel-1b по профильной линии по простиранию I-I за период 2019-2021гг (700 дней) / Fig. 2. Plot of comparison of settlements determination by leveling and radar interferometry in separate processing of Sentinel-1a and Sentinel-1b along the profile line along strike I-I for the period 2019-2021 (700 days).

В методе радарной интерферометрии смещения точек измеряются в наклонном направлении со спутника. Простая геометрическая проекция наклонных смещений в вертикальные, в условиях наличия как вертикальных, так и горизонтальных сдвижений, не всегда поможет выявить истинные значения вертикальных смещений земной поверхности. Имеющиеся исследования указывают на то, что максимум оседаний сдвигается вправо и влево от центра мониторинга в зависимости от траектории движения спутника [18].

Важно отметить, что на рассматриваемом месторождении как раз присутствуют горизонтальные сдвижения, которые могут оказывать влияние на истинные значения оседаний земной поверхности. Поэтому при определении оседаний земной поверхности методом радарной интерферометрии на данном объекте важно учитывать наличие горизонтальных сдвижений. Если использовать для обработки данные только с одного КА, то значения оседаний получаются неточными и смещенными по оси зондирования в направлении запад-восток. На рис. 3 показаны профили определяемых оседаний, формирующихся при использовании как отдельных данных с двух КА, так и суммарный профиль оседаний, рассчитанный на основе геометрического сложения векторов сдвижений с двух КА.

В результате совместной интерферометрической обработки данных с двух КА была получена карта вертикальных смещений за 2019-2021 гг. (рис. 4).

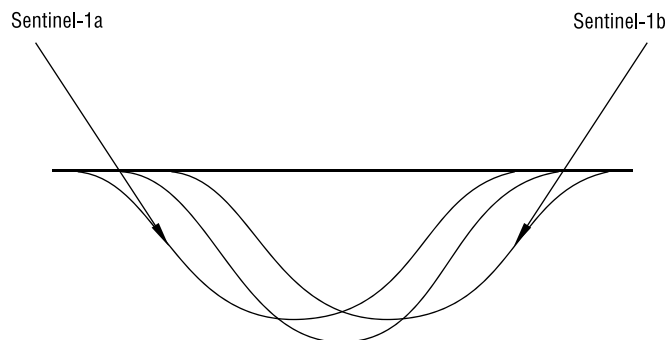


Рис. 3. Схема выявленного профиля мутьды оседаний в направлении запад-восток при вычислении смещений с отдельных КА: Sentinel-1a и Sentinel-1b, и суммарный профиль мутьды оседаний, полученный при комплексной обработке результатов с двух орбит / Fig. 3. Schematic of the detected east-west trough profile of individual Sentinel-1a and Sentinel-1b satellites and the total trough profile from the combined processing of the two orbits.

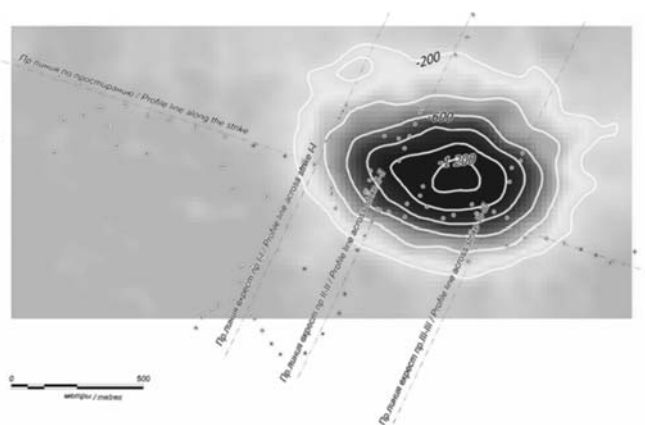


Рис. 4. Суммарная карта вертикальных смещений за 2019-2021 год по результатам совместной интерферометрической обработки сцен Sentinel-1a и Sentinel-1b(мм/год) / Fig. 4. Cumulative vertical displacement map for 2019-2021 from the joint interferometric processing of Sentinel-1a and Sentinel-1b scenes(mm/year).

Объективная оценка точности результатов выполненной работы осуществлена посредством сравнения данных, полученных методом радарной интерферометрии в точках с данными, полученными по результатам нивелирования II класса на соответствующих профильных линиях для объектов Яковлевского рудника. Оценочными точками служили реперы профильных линий.

По данным радарной интерферометрической съемки были составлены электронные таблицы с точками, на основе которых в пакете MapInfo строились карты скоростей оседаний. Для сравнительного анализа с данными нивелирования II класса были построены совмещенные графики скоростей вертикальных смещений земной поверхности. Совмещенные графики вертикальных смещений земной поверхности приведены на рис. 5-6.

Сопоставления результатов определения оседаний радарной интерферометрии и нивелирования в местах соответствующих профильных линий показали следующее. В период с 2019 по 2021 гг. средние отклонения в выявленных оседаниях на территории Яковлевского рудника составили 3 мм для линии по простиранию (I-I), и 60 мм для линии вкрест простирания (II-II).

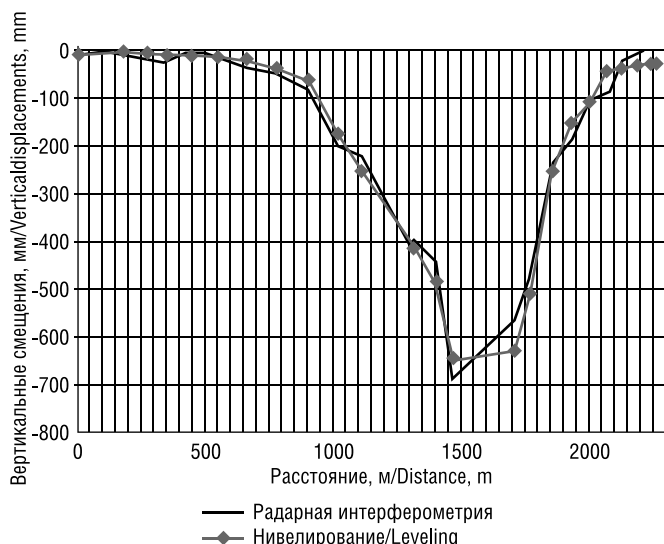


Рис. 5. График сопоставления определения оседаний методом нивелирования и методом радарной интерферометрии по профильной линии по простиранию I-I за период 2019-2021гг (700 дней) / Fig. 5. Plot of comparison of subsidence determination by levelling and radar interferometry along the profile line along strike I-I for the period 2019-2021 (700 days).

Для профилей оседаний по простиранию (I-I) отклонения в значениях получились незначительными и находятся на уровне погрешности измерения III класса точности нивелирования. Это обусловлено тем, что геометрически сложное определение оседаний выполнялось по оси, совпадающей с линией по простиранию, которая в свою очередь по положению близка к направлению оси зондирования спутников. Для линии вкрест простирания (II-II) профили оседаний расходятся на систематическую ошибку, связанную, очевидно, с отсутствием поправок за горизонтальные сдвигения в этом направлении [19].

Закключение

1. В данной статье на примере территории Яковлевского месторождения произведена совместная интерферометрическая обработка свободно распространяемых данных ДЗЗ Sentinel-1a и Sentinel-1b за период с 2019 по 2021 гг.

2. Выполненный комплекс работ по определению оседаний земной поверхности территории Яковлевского рудника методом радарной интерферометрии выявил мульту оседаний, которая по форме и значениям максимальных оседаний с определенным допущением соответствующую аналогичным результатам нивелирования III класса.

3. Проведенные исследования указывают на высокую эффективность данного метода для определения оседаний и деформаций земной поверхности. В период с 2019 по 2021 гг. средние отклонения в выявленных оседаниях на территории Яковлевского рудника составили величину 3 мм для

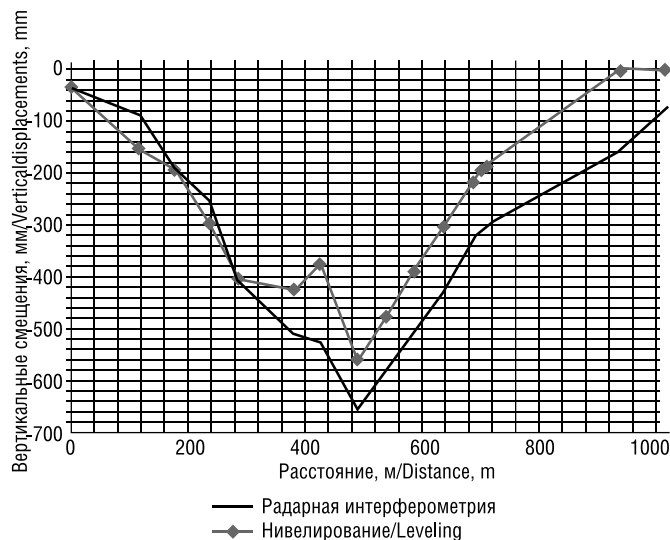


Рис. 6. График сопоставления определения оседаний методом нивелирования и методом радарной интерферометрии по профильной линии вкрест простирания II-II за период 2019-2021гг (700 дней) / Fig. 6. Plot comparing the determination of settlements by levelling and radar interferometry along the profile line across strike II-II for the period 2019-2021 (700 days).

линии по простиранию (I-I), и 60мм для линии вкрест простирания (II-II).

4. Установлено, что при использовании данных только с одного КА, и наличии на исследуемом объекте существенных горизонтальных сдвижений, значения оседаний могут быть смещенными в плане и неточными по числовым значениям. Поэтому для таких объектов методика использования данных с двух КА является приоритетной и позволяет получить истинные значения оседаний земной поверхности.

5. Сопоставление графиков определения оседаний методом нивелирования и методом радарной интерферометрии по профильным линиям указывает на высокую достоверность данного подхода.

6. Данный подход по определению геометрически сложных оседаний уверенно позволяет получать результаты по оценки оседаний в направлении зондирования запад-восток. Для определения меридиональных оседаний (юг-север) требуются дополнительные вводные. Так, построение абсолютных векторов сдвижений требует третьего вектора, которым может выступать проекция предполагаемых смещений, борт карьера [20], или имеющиеся данные горизонтальных сдвижений, измеренных натурным способом.

7. Оценка оседаний с учетом сложения векторов зондирования позволяет также получить величины горизонтальных сдвижений и их отделить от значений абсолютных сдвижений земной поверхности. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Мозер Д.В., Туякбай А.С., Толеубекова Ж. 3. О состоянии подработанных территорий Карагандинского угольного бассейна по данным космического мониторинга. // ФТПРПИ. 2017, № 2.- с. 170-176.
2. Пономаренко М. Р. Разработка метода деформационного мониторинга открытых горных работ в условиях крайнего севера с использованием космического радиолокационного зондирования: специальность 25.00.16 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Пономаренко Мария Руслановна; Санкт-Петербургский горный университет. - Санкт-Петербург, 2018. - 23 с. - Место защиты: Санкт-Петербургский горный университет.

3. Ponomarenko M.R., Pimanov I. Yu. Implementation of Synthetic Aperture Radar and Geoinformation Technologies in the Complex Monitoring and Managing of the Mining Industry Objects // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 574, Springer International Publishing Switzerland. - P. 291-299.
4. Franczyk A., Bala J., Dwornik M. Monitoring Subsidence Area with the Use of Satellite Radar Images and Deep Transfer Learning // *Sensors*, vol. 22, p. 1-14.
5. Чернов А.В., Исабаев К.Ж., Кидирбаев Б.И., Какимжанов Е.Х. Повышение эффективности мониторинга земной поверхности на территории Анненского месторождения с использованием космической радарной интерферометрии (КРИ) // *Маркшейдерия и недропользование*. - 2019, №2 - стр. 49-50.
6. Филатов А.В., Евтюшкин А.В., Васильев Ю.В. Многолетний геодинамический мониторинг нефтегазовых месторождений Западной Сибири методом спутниковой радарной интерферометрии // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2012, т.9, №2 с. 39-41
7. Одабаи-Фард В. В., Пономаренко М.Р. Геодинамический мониторинг земной поверхности и объектов горнодобывающей промышленности при помощи метода радарной интерферометрии // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. - 2017. - №11. - с. 59-63.
8. Mondini A. C., Santangelo M., Rocchetti M., Rossetto E., Manconi A., Monserrat O. Sentinel-1 SAR Amplitude Imagery for Rapid Landslide Detection // *Remote Sens*, vol. 11, p. 1-25.
9. Wegmuller U. Walter D., Spreckels V. and Charles L. Werner. Nonuniform Ground Motion Monitoring With TerraSAR-X Persistent Scatter Interferometry // *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. - [s.l.]: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010. - 2: Vol. 48. - pp. 895-904.
10. Мусихин В.В. Мониторинг процессов оседаний земной поверхности в районах интенсивного недропользования на основе интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования: специальность 25.00.16 «Горнопромышленная и нефтегазопромысловая геология, геофизика, маркшейдерское дело и геометрия недр»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Василий Владимирович Мусихин; Пермский национальный исследовательский политехнический университет. - Пермь, 2012. - 22с. - Место защиты: Горный институт Уральского отделения РАН.
11. Филатов А. В. Обнаружение подвижек земной поверхности в зоне интенсивной нефтедобычи методами радарной интерферометрии // *Вестник Югорского государственного университета*. - 2006г.. - 4. - стр. 103-109.
12. Zhang H., Wang C., Tang Y. Subsidence monitoring in coal area using timeseries InSAR combining persistent scatterers and distributed scatterers // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015. 39. 49-55
13. Borlaf-Mena I., Santoro M., Villard L., Badea O., Tanase M. A. Investigating the Impact of Digital Elevation Models on Sentinel-1 Backscatter and Coherence Observations // *Remote Sens*, vol. 12, p. 1-23.
14. Петренко, П.Б. Оценка влияния атмосферы на распространение широкополосных сигналов при радиолокационных измерениях / П.Б. Петренко // *Двойные технологии*. - 2006. - № 2(35). - С. 8-11.
15. Кашников Ю.А., Мусихин В.В., Лысков И.А. Определение оседаний земной поверхности подработанных территорий при разработке полезных ископаемых по результатам интерферометрической обработки радарных данных // *ФТПРПИ*. - 2012. №4. - с. 68-77.
16. Кашников Ю.А., Беляев К.В., Богданец Е.С., Согорин А.А. Маркшейдерское обеспечение разработки месторождений нефти и газа. Монография. - М.: ООО «Издательский дом Недра», 2018. - 454 с. стр. 302-318.
17. Соломенников М.Ю., Мусихин В.В., Харина Н.М. Оценка точности определения оседаний, полученных методами радарной интерферометрии по спутниковым снимкам ENVISAT и TerraSAR-X на территории промышленного объекта г. Березники // *Маркшейдерский вестник* - 2017г. - 2. стр. 44-49
18. Кузьмин, Ю. О. Актуальные вопросы использования геодезических измерений при геодинамическом мониторинге объектов нефтегазового комплекса // *Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий)*. - 2020. - Т. 25. - № 1. - С. 43-54.
19. Мусихин В.В., Тютюкова В.А., Харина Н.М. Оценка точности определения оседаний земной поверхности Риддерского ГОКа по результатам интерферометрической обработки данных космического радиолокационного зондирования. // *Маркшейдерия и недропользование* - 2023. - №1(123). с. 57-63.
20. Vasily Musikhin, Mikhail Solomennikov, Khvostanceva Anastasiya, Kharina Nina. Determination of Absolute Displacements of Tishinsky Opencast Mine Sides Based on Sentinel-1 Data. E-posters on FRINGE 2021. 31.05.-04.06.2021. ID 114

REFERENCES

1. Mozer D.V., Tuiakbai A.S., Toleubekova Zh.Z. On the state of the undermined territories of the Karaganda coal basin according to space monitoring data, *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and technical problems of mining], 2017, no 2, pp. 170-176.
2. Ponomarenko M. R. Developing a method for deformation monitoring of surface mining operations in the far north using space radar sensing: program 25.00.16 «Mining and oil and gas geology, geophysics, mine surveying and subsoil geometry»: thesis for the degree of candidate of technical sciences. / Ponomarenko Mariia Ruslanovna; Saint Petersburg Mining University. - Saint-Petersburg, 2018. - 23p. - Place of protection: Saint Petersburg Mining University.
3. Ponomarenko M.R., Pimanov I. Yu. Implementation of Synthetic Aperture Radar and Geoinformation Technologies in the Complex Monitoring and Managing of the Mining Industry Objects // *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 574, Springer International Publishing Switzerland. - P. 291-299.
4. Franczyk A., Bala J., Dwornik M. Monitoring Subsidence Area with the Use of Satellite Radar Images and Deep Transfer Learning // *Sensors*, vol. 22, p. 1-14.
5. Chernov A.V., Isabaev K.Zh., Kidirbaev B.I., Kakimzhanov E.Kh. Povyshenie effektivnosti monitoringa zemnoi poverkhnosti na territorii annenskogo mestorozhdeniia s ispol'zovaniem kosmicheskoi radarnoi interferometrii, Marksheideriia i nedropol'zovanie [Mine surveying and subsurface use], 2019, no 2, pp. 49-50.

6. Filatov A.V., Evtushkin A.V., Vasil'ev Iu.V. Long-term geodynamic monitoring of oil and gas fields in Western Siberia using satellite radar interferometry, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Modern problems of remote sensing of the Earth from space], 2012, vol.9, no 2, pp. 39-41
7. Odabai-Fard V. V., Ponomarenko M.R. Geodynamic monitoring of the earth's surface and mining facilities using the method of radar interferometry, *Gornyi informatsionno-analicheskii biulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2017, no. 11, pp. 59-63.
8. Mondini A. C., Santangelo M., Rocchetti M., Rossetto E., Manconi A., Monserrat O. Sentinel-1 SAR Amplitude Imagery for Rapid Landslide Detection // *Remote Sens*, vol. 11, p. 1-25.
9. Wegmuller U. Walter D., Spreckels V. and Charles L. Werner. Nonuniform Ground Motion Monitoring With TerraSAR-X Persistent Scatter Interferometry // *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. - [s.l.]: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010. - 2: Vol. 48. - pp. 895-904.
10. Musikhin V.V. Monitoring of the processes of subsidence of the earth's surface in areas of intensive subsoil use based on interferometric processing of space radar sounding data: program 25.00.16 «Mining and oil and gas geology, geophysics, mine surveying and subsoil geometry»: thesis for the degree of candidate of technical sciences. / Musikhin Vasilii Vladimirovich; Perm National Research Polytechnic University. - Perm, 2012. - 22p. - Place of protection: Institute of Mining of Ural branch of RAS.
11. Filatov A.V. Detection of Earth Surface Movements in the Zone of Intensive Oil Production by Radar Interferometry Methods, *Vestnik Iugorskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Yurga State University], 2006, no 4, pp. 103-109.
12. Zhang H., Wang C., Tang Y. Subsidence monitoring in coal area using timeseries InSAR combining persistent scatterers and distributed scatterers // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015. 39. 49-55
13. Borlaf-Mena I., Santoro M., Villard L., Badea O., Tanase M. A. Investigating the Impact of Digital Elevation Models on Sentinel-1 Backscatter and Coherence Observations // *Remote Sens*, 2022, vol. 12, p. 1-23.
14. Petrenko P. B. Assessing the influence of the atmosphere on the propagation of broadband signals in radar measurements // *Dual Tecnology*, 2006, vol. 2(35), p. 8-11.
15. Lyskov I.A., Kashnikov Iu.A., Musikhin V.V. Determination of subsidence of the earth's surface of undermined territories during the development of minerals based on the results of interferometric processing of radar data, *Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and technical problems of mining], 2012, no. 4.
16. Kashnikov Iu.A., Beliaev K.V., Bogdanets E.S., Sogorin A.A. Surveying support for the development of oil and gas fields. Monograph, Moscow, Izdatel'skii dom Nedra [Nedra Publishing House], 2018, pp. 302-318.
17. Solomennikov M.Y., Musikhin V.V., Kharina N.M., Estimation of the accuracy of the determination of subsidence obtained by radar interferometry from satellite images of envisat and terrasars-x on the territory of the industrial site of Berezniki, *Marksheiderskii vestnik* [Mine surveying bulletin], 2017, no. 2, pp. 44-49.
18. Kuzmin Yu. O. Topical issues of use of geodetic measurements at geodynamic monitoring of objects of oil and gas complex // *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies (SSUGT)*, 2020, vol. 25-1, p. 43-54.
19. V.V. Musikhin, V.A. Tiutiukova, N.M. Kharina. Evaluation of the accuracy of determining the subsidence of the Earth's surface of the Ridder GOK based on the results of interferometric processing of space radar sensing data // *Mine surveying and subsurface use*, 2023, vol. 1 (123), p. 57-63
20. Vasilii Musikhin, Mikhail Solomennikov, Khvostanceva Anastasiya, Kharina Nina. Determination of Absolute Displacements of Tishinsky Opencast Mine Sides Based on Sentinel-1 Data. E-posters on FRINGE 2021. 31.05.-04.06.2021. ID 114.

КРИТЕРИИ АВТОРСТВА / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей. / The authors participated equally in the writing and collection of the material, as well as its processing.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. / The authors declare no conflict of interest.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тютюкова Виктория Александровна:

ассистент,
инженер кафедры Маркшейдерского дела, геодезии
и геоинформационных систем,
Пермский национальный исследовательский политехнический
университет,
г. Пермь, Россия,
e-mail: tyutyukova.va@yandex.ru

Голубничий Денис Валерьевич:

генеральный директор,
ООО «Яковлевский ГОК»,
Белгородская область, пос. Яковлево, Россия,
e-mail: severstal@severstal.com

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tiutiukova Viktoriia:

assistant lecturer,
engineer,
Department of mine surveying, geodesy and geoinformation systems,
Perm national research polytechnic university,
Perm, Russia,
e-mail: tyutyukova.va@yandex.ru

Golubnichy Denis Valeryevich:

General Director,
Yakovlevsky GOK LLC,
Belgorod region, Yakovlevo village, Russia,
e-mail: severstal@severstal.com

Гилязов Денис Хайдарович:

начальник службы гидрогеомеханического мониторинга,
ООО «Яковлевский ГОК»,
Белгородская область, пос. Яковлево, Россия,
e-mail: dkh.giliazev@severstal.com

Gilyazev Denis Khaidarovich:

head of hydrogeomechanical monitoring service, Yakovlevsky GOK
LLC,
Belgorod region, Yakovlevo village, Russia,
e-mail: dkh.giliazev@severstal.com



РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ СЕРГО ОРДЖОНИКИДЗЕ (МГРИ)

Информируем Вас

Университет берет свое начало с геологоразведочного факультета
Московской горной академии, созданной в сентябре 1918 г.

Факультеты:

- ◆ Геологоразведочный факультет,
- ◆ Факультет технологии разведки и разработки,
- ◆ Факультет геологии и геофизики нефти и газа,
- ◆ Гидрогеологический факультет,
- ◆ Факультет экономики и управления,
- ◆ Экологический факультет

Для зачисления в Университет в 2022 году необходимо подать заявление о согласии на зачисление и оригинал документа
об образовании не позднее 18 часов 28 июля 2022 года.

Контакты : 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; +7(495)255-40-20 10:00-18:00 e-mail: priem@mgri.ru,
<https://www.mgri.ru/commission/poryadok-postupleniya/>



WWW.N-GN.RU



УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



ФГБОУ ВО «Уральский государственный горный университет» был создан 3(16) июля 1914 г. в Екатеринбурге.

Факультеты: ГОРНО-МЕХАНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ (ГМФ), ГОРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ (ГТФ),
ИНЖЕНЕРНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ (ИЭФ), ФАКУЛЬТЕТ ГЕОЛОГИИ И ГЕОФИЗИКИ (ФГиГ).

Прием документов для поступления в университет начинается 03 июня 2022 года.

Контакты : +7 (343) 257-25-47, +7 (343) 283-06-06, e-mail: office@ursmu.ru; rector@ursmu.ru, <http://www.ursmu.ru/sveden/common>

WWW.N-GN.RU